ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXII, 3, 1969 Серия технических наук

ЭНЕРГЕТИКА

М. М. МАРКОСЯН, Д. О. АВЕТИСЯН, Ю. М. АГАСЯН, М. С. САРКИСЯН

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

Многофазные системы широко применяются в практике использования электрической энергии. В общем случае отдельные фазы многофазной системы работают не в одинаковых условиях, что, конечно, нежелательно, а в некоторых случаях недопустимо. Во избежание нежелательной асимметрии режимов работы отдельных фаз стараются обеспечить симметрию как линии передачи, так и нагрузки. Одним из наиболее эффективных методов достижения симметрии является транспозиция фаз, обеспечивающая одинаковость условий работы отдельных фаз. В настоящее время в СССР и за рубежом находят применение трехфазные коаксиальные силовые кабели, которые в силу условий прокладки и конструктивных особенностей являются существенно несимметричными и не допускают транспозицию. В отличие от случая симметричных систем, где анализ системы сводится к расчету одной фазы и не представляет особых трудностей, расчет несимметричных многофазных систем связан с определенными трудностями, обусловленными относительной сложностью как аналитического исследования, так и физическими явлениями, происходящими в них.

Исследования несимметричных многофазных систем в общем случае приводят к выявлению весьма интересных явлений, выражающихся в появлении дополнительных активных составляющих напряжения в результате электромагнитного взаимодействия отдельных фаз.

Рассмотрим многофазную систему передачи в общем случае. Известно, что для расчета k-фазы такую систему можно заменить эквивалентной ей в магнитном отношении системой из n контуров [1]:

$$k - i \; (i = 0 \div n, \; i \neq k).$$

Падение напряжения в контуре $k - i$ равно:

$$-\Delta U_{k-i} = \dot{I}_i R_{k-i} + j\omega \dot{I}_i L_{k-i} + \dot{I}_i (Z_k + Z_i), \tag{1}$$

где

$$R_{k-i} = R_k + R_i;$$

L_{k-i} — индуктивность контура $k - i$;

Z_k, Z_i — импедансы нагрузок в фазах k, i.

Индуктивность контура $k - i$ следуя [2], может быть представлена в виде суммы собственных и взаимных индуктивностей составляющих его участков — проводников k, l:

$$L_{k-l} = L_k + L_l + 2M_{kl}. \tag{2}$$

С учетом (2) выражение (1) можем записать в виде

$$-\Delta \dot U_{k-l} = \dot I_l (R_k + R_l) - j\omega \dot I_l (L_k - L_l + 2M_{kl}) + \dot I_l (\dot Z_k + Z_l).$$

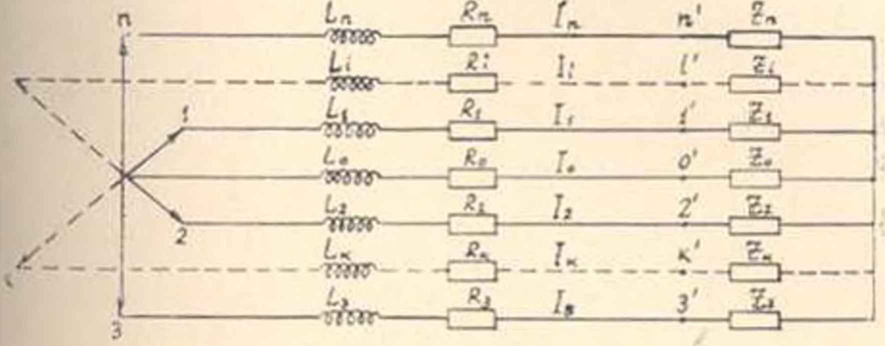

Рис. 1.

Доля падения напряжения в контуре $k - l$, приходящаяся на проводник k, будет

$$-\Delta \dot U_{k(l)} = \dot I_l R_k + j\omega \dot I_l (L_k + M_{kl}).$$

Производя суммирование по всем контурам, получим падение напряжения на проводнике k:

$$\Delta \dot U_k = \dot I_k R_k + j\omega \dot I_k L_k - \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{n} j\omega \dot I_l M_{kl} =$$

$$= \dot I_k \left[R_k + j\omega \left(L_k - \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{n} a_{kl} e^{j\left[(l-k)\frac{2\pi}{n+1} + \psi_{kl}\right]} M_{kl} \right) \right] =$$

$$= \dot I_k [R_k + j\omega (L_k - l_k - jr_k)] = \dot I_k [(R_k + \Delta R_k) + j\omega (L_k + \Delta L_k)], \tag{3}$$

где $a_{kl} e^{j\left[(l-k)\frac{2\pi}{n+1} + \psi_{kl}\right]} = \dfrac{\dot I_l}{\dot I_k}$;

a_{kl} — отношение амплитуд $\dot I_l$ и $\dot I_k$;

$(l - k)\dfrac{2\pi}{n+1} + \psi_{kl}$ — разность фаз токов $\dot I_l$ и $\dot I_k$;

$$l_k = Re \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{n} a_{kl} e^{j\left[(l-k)\frac{2\pi}{n+1} + \psi_{kl}\right]} M_{kl};$$

$$r_k = Im \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{n} a_{kl} e^{j\left[(l-k)\frac{2\pi}{n+1} + \psi_{kl}\right]} M_{kl};$$

$\Delta R_k = \omega r_k$ — функция от ω, M_{ki}, a_{ki}, α_{ki};

$\Delta L_k = -l_k$ — функция от M_{ki}, a_{ki}, α_{ki}.

В формуле (3) привлекает внимание появление члена ΔR_k (ω, M_{ki}, a_{ki}, α_{ki}) — дополнительного, активного сопротивления, вызванного взаимной индуктивностью между фазами, и зависящего от частоты ω и от степени несимметрии системы a, α. Это явление на первый взгляд может показаться парадоксальным, так как наличие дополнительного, активного сопротивления порождено исключительно реактивными элементами системы. Однако можно показать, что сумма активных потерь на дополнительных, активных сопротивлениях во всех фазах равна нулю. Действительно, активная мощность на сопротивлении ΔR_k в k-фазе равна:

$$\Delta P_k = I_k^2 \Delta R_k = I_k^2 \omega r_k = I_k^2 \omega\, Im \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} a_{ki} e^{j\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right]} M_{ki} =$$

$$= I_k^2 \omega\, Im \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} \frac{I_i}{I_k} e^{j\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right]} M_{ki} =$$

$$= \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} I_k I_i \sin\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right] \omega M_{ki}. \tag{4}$$

Суммарная дополнительная мощность во всех фазах будет

$$\Delta P = \sum_{k=0}^{n} \Delta P_k = \sum_{k=0}^{n} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} I_k I_i \sin\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right] \omega M_{ki} =$$

$$= \sum_{\substack{i=0 \\ k=0 \\ i \neq k}}^{n} I_k I_i \sin\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right] \omega M_{ki} = 0, \tag{5}$$

так как

$$M_{ki} = M_{ik};\ \sin\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right] = -\sin\left[(k-i)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ik}\right].$$

Таким образом, суммарная активная мощность на дополнительных активных сопротивлениях ΔR_k во всех фазах равна нулю. Это значит, что кажущуюся дополнительную активную потерю мощности на какой-либо фазе k следует понимать как передачу энергии от этой фазы к остальным через взаимные индуктивности, причем в таких соотношениях, что если на одних фазах наблюдается потеря активной мощности, в остальных фазах имеется в таком же количестве избыток ее. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что дополнительные активные мощности в отдельных фазах зависят от частоты, чего следовало и ожидать.

так как своим происхождением они обязаны наличию индуктивной связи между фазами, о чем было упомянуто выше. Наличием индуктивной связи между фазами обусловлена также дополнительная реактивная мощность на индуктивностях ΔL_k, к рассмотрению которой переходим.

Дополнительная реактивная мощность в k-фазе, очевидно, будет:

$$\Delta Q_k = I_k^2 \omega \Delta L_k = -I_k^2 \omega l_k = -I_k^2 \, Re \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} a_{ki} e^{j\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right]} \omega M_{ki} =$$

$$= -\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} I_k I_i \cos\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right] \omega M_{ki}. \qquad (6)$$

Суммарная дополнительная реактивная мощность во всех фазах в силу того, что $\cos\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl}\right] = \cos\left[(k-i)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ik}\right]$ будет

$$\Delta Q = -2 \sum_{\substack{i=0 \\ k=1 \\ i<k}}^{\substack{k=n \\ i=n-1}} I_k I_i \cos\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right] \omega M_{ki}. \qquad (7)$$

Это выражение в общем случае отлично от нуля и, следовательно, имеет место приращение реактивной мошности системы. Следует отметить, что это приращение может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от того, какой эффект является преобладающим: индуктивный или емкостный. В частном случае суммарная реактивная мощность может быть равна нулю—явление резонанса. Следует заметить, что приведенные специфические энергетические соотношения присущи всем несимметричным многофазным системам независимо от того, порождена эта асимметрия нагрузкой или линией передачи. В этом свете представляют интерес три предельных случая:

1. Токи симметричны, линия несимметричная.

В этом случае, очевидно $I_i = I_k = I$; $\alpha_{ki} = 0$;

$$\Delta P_k = I^2 \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} \omega M_{ki} \sin(i-k)\frac{2\pi}{n+1};$$

$$\Delta Q_k = -I^2 \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} \omega M_{ki} \cos(i-k)\frac{2\pi}{n+1}.$$

2. Токи несимметричны, линия симметричная

$$I_i \neq I_k; \quad \alpha_{ki} \neq 0; \quad M_{ki} = M_{kj} = M;$$

$$\Delta P_k = \omega M \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} I_k I_i \sin\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right];$$

$$\Delta Q_k = -\omega M \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} I_k I_i \cos\left[(i-k)\frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki}\right].$$

3. Нагрузка и линия симметричны

$$I_i = I_k = I; \quad \alpha_{ki} = 0; \quad M_{ki} = M_{kj} = M;$$

$$\Delta P_k = \omega M I^2 \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} \sin (i-k) \frac{2\pi}{n+1} = 0;$$

$$\Delta Q_k = -\omega M I^2 \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} \cos (i-k) \frac{2\pi}{n+1} = \omega M I^2.$$

На основании этих выражений и с учетом (4) и (6) можно утверждать, что в абсолютно симметричных системах

$$\Delta R_k = 0; \quad \Delta L_k = M.$$

Это позволяет расчет симметричной многофазной системы свести к расчету одной фазы, индуктивность которой должна быть увеличена на величину M.

Резюмируя изложенное, можно отметить, что в асимметричных многофазных системах необходимо каждую фазу рассчитывать в отдельности.

В асимметричных многофазных системах имеют место дополнительные активные потери в отдельных фазах, причем сумма всех дополнительных активных мощностей в системе в целом равна нулю. В общем случае дополнительная реактивная мощность в системе в целом не равна нулю. В симметричных многофазных системах дополнительные активные потери исчезают в каждой фазе в отдельности, а дополнительные реактивные потери во всех фазах равны между собой.

КТБ, ВНИИЭМ

Поступило 5.II.1969.

Մ. Մ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Գ. Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Յու. Մ. ԱՂԱՅԱՆ, Մ. Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԲԱԶՄԱՖԱԶ ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածում դիտված են ոչ սիմետրիկ բազմաֆազ սիստեմներում տեղի ունեցող էներգետիկ երևույթները։ Ցույց է տրված, որ միջֆազային էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության հետևանքով առանձին ֆազերում նկատվում է լրացուցիչ թվացող ակտիվ դիմադրություն։

Ապացուցված է, որ լրացուցիչ ակտիվ հզորությունը հավասար է զերոյի. հետևաբար, նկատվող երևույթը չի հակասում էներգիայի պահպանման ու փոխանակման օրենքին։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Круг К. А.* Основы электротехники. М., 1952.
2. *Цейтлин Л. А.* Индуктивности проводов и контуров, М., 1950.